

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ ŽÁRUPEVNÝCH OCELÍ METODOU 121 DO ÚZKÉ
MEZERY.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ LUKOSZ

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ ŽÁRUPEVNÝCH OCELÍ METODOU 121 DO ÚZKÉ MEZERY.

WELDING OF HEAT - RESISTENT STEELS BY NARROW GAP SMAW METHOD.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ONDŘEJ LUKOSZ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ondřej Lukosz

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Svařování žárupevných ocelí metodou 121 do úzké mezery.

v anglickém jazyce:

Welding of heat - resistant steels by narrow gap SMAW method.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařování velkých tloušťek (nad 100mm) žárupevných ocelí do úzké mezery metodou 121 (automaticky pod tavidlem) přináší v porovnání se současně používanou metodou 141 (TIG) značné časové úspory. Pro danou žárupevnou ocel je třeba stanovit parametry svařování, vhodný přídavný materiál a tavidlo, teplotu předehřevu a případné tepelné zpracování po svaření.

Cíle diplomové práce:

- 1) Stručný popis současného stavu
- 2) Posouzení svařitelnosti dané oceli
- 3) Výběr přídavného materiálu a tavidla
- 4) Experimentální ověření, vyhodnocení experimentů
- 5) Zpracování návrhu PWPS

Seznam odborné literatury:

1. Kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0
2. ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov. Bratislava. ETERNA PRESS 2003. 202 s. ISBN 80-968359-5-5
3. ESSAB, FRONIUS, KEMPPI, firemní materiály
4. Kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: ZEROSS 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3
5. ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 18.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

LUKOSZ Ondřej: Svařování žárupevných ocelí metodou 121 do úzké mezery.

Projekt vypracovaný v rámci inženýrského studia, oboru 2307, předkládá návrh svařovacího postupu žárupevné oceli. Ta se užívá na výrobu energetických zařízení. Energetické zařízení typu parní turbína využívá materiálu 30CrMoNiV 5-11. Jedná se o svařování do úzké mezery automaticky pod tavidlem. Nejdůležitějším parametrem odstranitelnosti strusky je volba tavidla a přídavného materiálu. Na základě literární studie této problematiky byl navržen speciální postup svařování, zvoleno vhodné tavidlo a vhodný přídavný materiál. Pro experiment byla zvolena vhodná teplota předehřevu.

Klíčová slova: Ocel 30CrMoNiV 5-11, 121, úzká mezera, žárupevná ocel

ABSTRACT

LUKOSZ Ondřej: Produce Welding of heat - resistant steels by method SMAW into the narrow gap.

The project elaborated in frame of engineering studies branch 2307. The project is submitting design of technology production of the weld procedure creep metal. It uses in manufactory power equipment. The power equipment, the type of steam turbine, uses steel 30CrMoNiV 5-11. The welding into the narrow gap has its specifics. The most important parameter is the choice of flux and filler metal. We must decide appropriate flux for convenient disposing of slag. Based on the literature study these problems were proposed the specified welding procedure, appropriate flux and appropriate additional material. For the experiment was selected appropriate temperature of preheating.

Keywords: 30CrMoNiV 5-11 steel, 121, narrow gap, heat resisting steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LUKOSZ, O. *Svařování žárupevných ocelí metodou 121 do úzké mezery..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 45 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 25.5.2010

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc.Ing Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

Obsah

ZADÁNÍ

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

Obsah

1. Úvod	- 11 -
2. Svařování pod tavidlem	- 12 -
2.1. Princip.....	- 12 -
2.2. Způsoby svařování pod tavidlem.....	- 13 -
2.2.1. Semiautomatické svařování.....	- 13 -
2.2.2. Automatické svařování	- 13 -
2.2.3. Mechanizované svařování	- 13 -
2.3. Zařízení pro svařování 121	- 14 -
2.3.1. Zdroje proudu	- 14 -
2.3.2. Svářecí hlavy a hořáky	- 14 -
2.3.3. Svářecí traktory.....	- 14 -
2.4. Výhody technologie svařování pod tavidlem	- 15 -
2.5. Nevýhody technologie svařování pod tavidlem	- 15 -
2.6. Svařování do úzké mezery.....	- 15 -
2.6.1. Technika svařování do úzké mezery	- 16 -
2.6.2. Úprava začátků a konců housenek a oprava vad v průběhu svařování	- 16 -
2.6.3. Výhody svařování do úzké mezery pod tavidlem	- 17 -
2.6.4. Nevýhody svařování do úzké mezery pod tavidlem.....	- 18 -
2.7. Tavidla	- 18 -
2.7.1. Dělení tavidel.....	- 19 -
2.7.2. Index bazicity	- 20 -
2.7.3. Tavidla do úzkého úkosu.....	- 20 -
2.8. Přídavné materiály	- 21 -
2.9. Volba svařovacích parametrů	- 21 -
2.10. Svařitelnost	- 24 -
2.10.1. Vliv chemického složení na svařitelnost ocelí	- 25 -
2.10.2. Teplota předehřevu	- 26 -
2.10.3. Další důležité teploty při svařování	- 28 -
2.11. Svařitelnost energetických zařízení	- 28 -
2.12. Heterogenní svarové spoje	- 29 -
2.12.1. Schaefflerův diagram.....	- 29 -
2.12.2. Proces svařování	- 30 -

3. Žárupevné materiály.....	- 32 -
3.1. Nízkolegované žárupevné oceli	- 32 -
3.2. Mechanismy zpevnění a degradační procesy	- 32 -
3.2.1. Precipitační zpevnění	- 33 -
3.2.2. Zpevnění tuhého roztoku	- 33 -
3.2.3. Degradační procesy	- 33 -
3.3. Žárupevné vlastnosti svarových kovů.....	- 34 -
3.3.1. Vliv chyb na žárupevné vlastnosti svarových spojů	- 34 -
3.4. Svařitelnost ocelí s 2 až 3 % Cr	- 34 -
3.5. Křehnutí ve svarovém spoji	- 35 -
4. Zhodnocení současného stavu	- 36 -
4.1. Používaná technologie TIG.....	- 36 -
4.1.1. Výhody TIG	- 37 -
4.1.2. Nevýhody TIG	- 37 -
4.1.3. Použití TIG.....	- 38 -
4.2. Konstrukce svaru.....	- 38 -
5. Závěry	- 39 -
Seznam použité literatury	- 40 -
Seznam použitých zkratk a symbolů	- 43 -
Seznam příloh.....	- 45 -

1. Úvod

Žárupevné materiály mají v energetickém odvětví svoje nezastupitelné místo. K jejich nejvýznamnějším vlastnostem patří zachovávání si mechanických vlastností i za vysokých teplot nad 500 °C. Rozvojem energetického průmyslu jsou na tyto materiály kladeny vyšší nároky. Ať už je to vzrůstající teplota, či rostoucí tlak používaného média.

Pro parní turbíny se používají podle vstupních parametrů páry různé materiály žárovevných ocelí. Nejnížší požadavky jsou kladeny na nízkotlakou část naopak nejvyšší požadavky jsou kladeny na vysokotlakou část. Při vzrůstající ceně materiálů používaných na tato energetická zařízení se jednotlivé části parních turbín svařují.

V současné době se parní turbíny svařují metodou 141, tedy technologií TIG. Tato metoda není příliš produktivní, proto se hledají jiné varianty výroby. Touto variantou by měla být technologie svařování 121, tedy automaticky pod tavidlem drátovou elektrodou. Tato technologie je oproti stávající velmi produktivní, tedy i ekonomicky výhodnější.

Jedním z významných problémů při aplikaci této technologie v úzkém úkosu je odstranitelnost strusky ze svaru. Tento problém se navyšuje s použitím přehřevu při svařování. U zadané oceli žárupevné oceli 30CrMoNiV 5-11 je pravděpodobné že přehřev bude dosahovat vyšších teplot. Vhodnou volbou tavidla, přídavných materiálů a svařovacích parametrů je třeba dosáhnout lehké, či dokonce samovolné odstranitelnosti strusky.

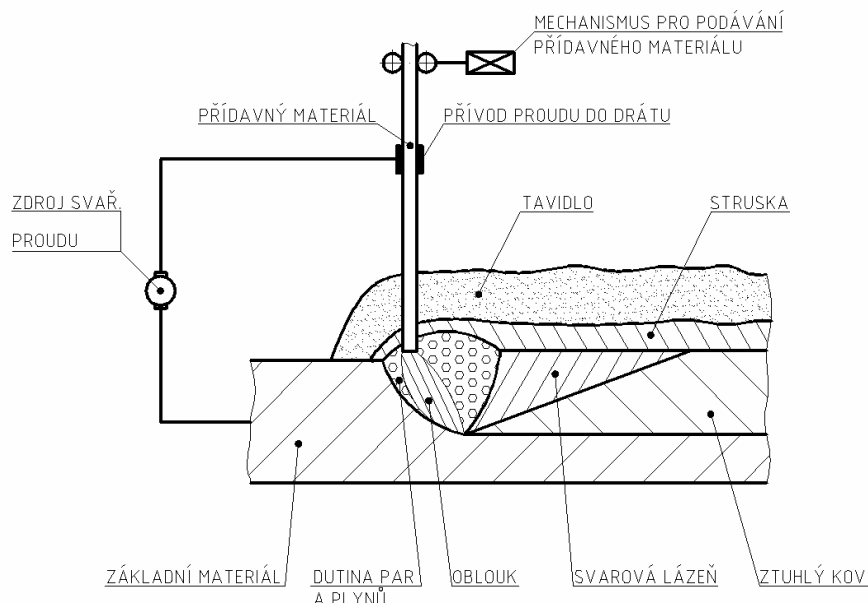
2. Svařování pod tavidlem

Je proces, při kterém dochází ke spojení dvou materiálů jejich vzájemným slitím. Teplo potřebné k tomuto procesu se získává z elektrického oblouku. Tato metoda byla poprvé využita v roce 1935 v USA.

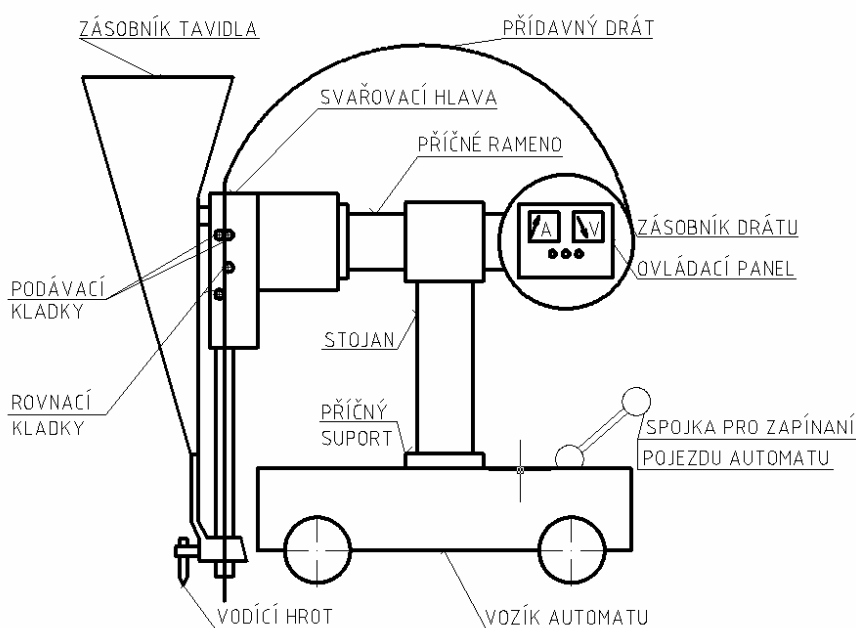
Svařování pod tavidlem je velmi produktivní způsob spojování materiálů. Je při něm možno použít proudové zátěže až do 3600 A, napětí může být 20 až 50 V, rychlost svařování 30 až 350 cm/min. Svařovací proud může být střídavý i stejnosměrný [2], [5], [8], [14]

2.1. Princip

Konec přídavného materiálu ve formě drátu, trubičky nebo pásky je vložený do tavidlového násypu, který pokrývá celou oblast budoucího svaru. Elektrický oblouk hoří mezi elektrodou a svařovaným materiálem. Po zapálení oblouku se oblast budoucího svaru nahřeje na vysoké teploty tavení kovu, přičemž se vytavuje přídavný materiál. Ten je rovnoměrně podáván do oblouku a také se přetavuje část svářených materiálů. Jejich vzájemných slitím se vytvoří svarový kov. Stejně jako přídavný materiál, tak se i tavidlo kontinuálně podává do oblasti svaru. Velká část tavidla se roztaví a vytvoří strusku, která plave na povrchu roztaveného kovu. Po ztuhnutí svaru část tavidla vytváří struskovou kůru.



Obr 2.1. Schéma principu svařování pod tavidlem [4]



Obr. 2.2. Schéma zařízení pro svařování pod tavidlem [4]

Ta chrání svarový kov před okolním prostředím, dezoxiduje a dezulfurizuje svarový kov. Může ho také dolegovávat. V důsledku magnetického pole vytvořeného procházejícím proudem se svarový kov rychle promíchá. [5], [8]

2.2. Způsoby svařování pod tavidlem

Při všech metodách svařování musí být svar polohován a udržován ve vodorovné poloze a to až do ztuhnutí svarového kovu i strusky. Jinak by hrozilo nebezpečí vytečení svarového kovu. [5]

2.2.1. Semiautomatické svařování

Používá se při něm ruční hlavy, kterou podáváme do svaru přídatný materiál (elektrodu) i tavidlo. Elektroda je do svaru dopravována pomocí podavače, zatímco tavidlo může do svaru padat gravitačně ze zásobníku. Ruční hlavy jsou určeny jen pro malé průměry přídatných materiálů a malé proudové zátěže. [5]

2.2.2. Automatické svařování

Svářeč nastaví požadované parametry na svařovacím traktoru (Obr. 2.3.) a nastartuje svar. Celý cyklus svařování je řízen automaticky za dozoru odpovědného pracovníka. [5]



Obr. 2.3. Svařovací traktor A2 Multitrac od firmy ESAB [15]

2.2.3. Mechanizované svařování

Při této metodě se používá motorový pohyb svařovacího traktoru. Svářeč potom ustavuje a vede svařovací hlavu na místo startu a kontroluje průběh svařování. Je-li potřeba přenastavuje parametry během svařování. Také svařovací proces ukončuje. [5]

2.3. Zařízení pro svařování 121

2.3.1. Zdroje proudu

Při svařování pod tavidlem je možné použít více systémů proudových zdrojů. Při svařování jednosměrným proudem to mohou být rotační zdroje nebo invertory, zdroje s konstantním proudem nebo konstantním napětím.

Jednosměrné zdroje s konstantním napětím: jsou dimenzované na proud 400 až 1500 ampér. Při proudech do 100 ampér lze použít drát o průměru až 6,4 mm. Při vysoké proudové zátěži je však foukání oblouku velmi vysoké, což způsobuje nevhodné formování svaru. Pro stabilní oblouk je třeba zajistit specifickou proudovou zátěž drátu a to min. $23 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (z průměru elektrody)

Zdroj s konstantním napětím: svařovací proud nepřesahuje 1000 A. Tento zdroj je samoregulující, tzn. že lze použít podavač drátu s konstantní rychlostí. Zdroj je vhodný na svařování tenkých plechů vysokými rychlostmi.

Jednosměrné zdroje s konstantním proudem: tento zdroj není samoregulující, proto musí být vybaven snímači napětí na oblouku, které kontrolují rychlost podávání drátu. Tyto zdroje jsou komplexnější a tedy dražší.

Zdroje s kombinací konstantního napětí a konstantního proudu: pro proudy do 650 A. lze použít pro všechny druhy obloukového svařování.

Zdroje se střídavým proudem: většinou to jsou transformátory, jejich intenzita proudu je 800 až 1500 A. Pro získání větší intenzity je možné zapojit dva zdroje paralelně. Tyto zdroje se využívají pro svařování s vysokou proudovou zátěží, při svařování více přídatnými dráty a při svařování do úzké mezery. [5], [8], [13]

2.3.2. Svářecí hlavy a hořáky

Skládá se z pohonného elektromotoru, převodové skříně, podávací a přitlačné kladky, vyrovnávací kladky a čelisti pro přívod svařovacího proudu do drátu.

Musí umožňovat chod a kontrolu podavače přídatného materiálu s výstupní kontaktní hubicí do místa svařování. Podavač drátu musí zajišťovat plynulý přísun navolenou rychlostí, většinou se pohybuje v rozpětí 10 až $230 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Ke svářecí hlavě je také připevněná hubice dodávající tavidlo k místu hoření oblouku. [5], [6]



Obr. 2.4. Svařovací hlava A6 S Arc Master od firmy ESAB [15]

2.3.3. Svářecí traktory

Svařovací hlava pokud není fixována, pro svařování rotačních svařenců, je uchycena na svařovacím traktoru viz. Obr. 2.3. Traktor se pohybuje po kolejnicové dráze, má umožňovat ovládání polohy svařovací hlavy. Může mít vestavěné funkce pro přímé ovládání podavače a nastavení rychlosti svařování. Pro dodržení konstantní rychlosti traktoru po dráze je vybaven servomotorem pohánějící všechna kola. Na traktoru je také umístěno zařízení pro sběr nespotřebovaného tavidla. Je to hubice, která v určité vzdálenosti odsaje nespotřebované

tavidlo do zásobníku, odkud se může opětovně použít. Tato hubice může být vybavena zařízením pro odstraňování strusky, která přilnula na svarovém kovu. [5]

2.4. Výhody technologie svařování pod tavidlem

- vysoká kvalita svařování
- díky stabilnímu oblouku získáváme rovnoměrné chemické složení
- svářeč ani okolní pracovníci nejsou vystaveni účinkům elektrického oblouku
- minimální nebezpečí vzniku zápalů a porezity svarového kovu
- žádná struska na povrchu svaru
- malé nebezpečí studených spojů vzhledem ke stálému průvaru
- vysoký výkon navaření
- vysoká tepelná účinnost
- vysoký průvar
- nulové tepelné zatížení okolí
- nedochází k rozstříku svarového kovu, okolí svaru a svar samotný je čistý
- nevzniká žádný dým, který by bylo třeba odsávat [2], [6], [14]

2.5. Nevýhody technologie svařování pod tavidlem

- nutná přesná příprava svarových ploch
- velké nároky na čistotu základního a přídavného materiálu
- metoda vhodná pouze pro polohy PA, PB
- nelze pozorovat svařovací proces v průběhu svařování a tím je i obtížná jeho kontrola během svařování
- vysoké náklady na operaci [2], [6]

2.6. Svařování do úzké mezery

Tato technologie svařování pod tavidlem obvodových svarových spojů značně snižuje časovou a materiálovou náročnost procesu, aniž by se snížila kvalita svaru.

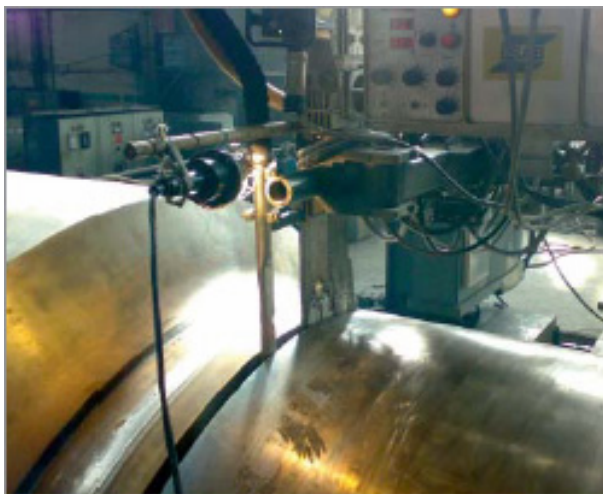
Svařování velkých tloušťek pod tavidlem má svá specifika. Ty můžeme rozdělit do tří skupin. První skupinu tvoří otázka technologie svařování, která řeší vhodnou volbu skladby housenek, svařovacích parametrů, přídavných svařovacích materiálů aj. Vyřešení těchto parametrů zajišťuje vytvoření bezdefektního svarového spoje



Obr 2.5. Úzká mezera [3]

s požadovanými mechanickými vlastnostmi. Důležitou součástí svařovacího procesu je snadné odstranění strusky. Druhá skupina řeší svařovací zařízení a zařízení pro ohřev. Pro správné zhotovení svaru je nutné, aby svařovací zařízení zajistilo přesné vedení svařovací hubice, kvalitní rovnání drátu, úzkou svařovací hubici s elektricky izolovaným povrchem a zpětné vazby mezi svařovacím zařízením a polohovadlem. Do třetí skupiny patří otázka týkající se zařízení pro zabrušování začátků a konců housenek, případně opravy vzniklých vad.

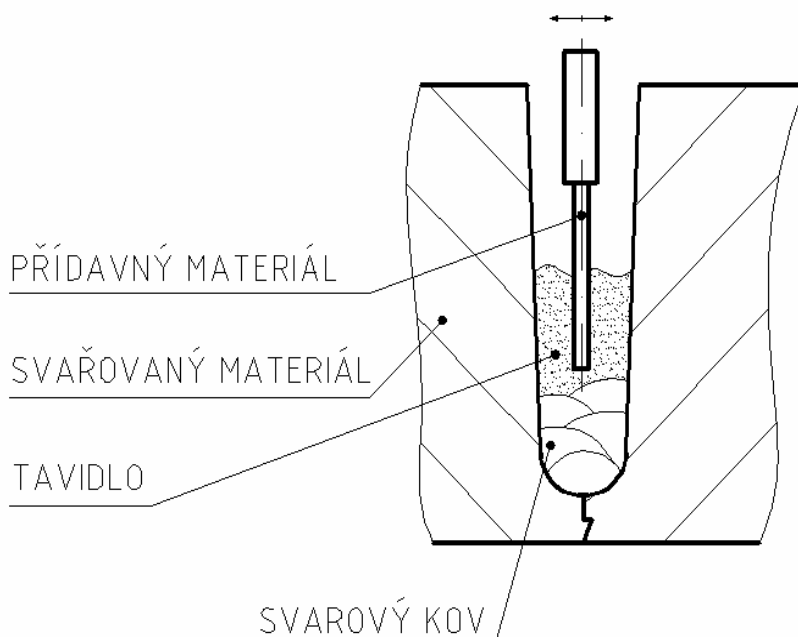
Úzkomezerové svařování pod tavidlem přineslo efekt ve zvýšení pevnostní hladiny svarových spojů. Z experimentů bylo zjištěno, že se zmenšující se šířkou svarové mezery se velikost meze kluzu i meze pevnosti zvětšuje. To má zejména velký význam při vnějším povrchu, kde je rozevření svaru největší. Také se potvrdilo, že velikost meze kluzu a meze pevnosti závisí také na tloušťce svaru. Z klasických svarů, které mají velké rozevření, je patrný velký rozdíl mezi hodnotami získanými na vzorcích umístěných v blízkosti povrchu a ve středu svařované tloušťky. Zatímco úzkomezerové svary mají hodnoty poměrně rovnoměrné. [2], [6], [10]



Obr 2.6. Svařování do úzké mezery [2]

2.6.1. Technika svařování do úzké mezery

Volí se většinou podle šířky materiálu. Nejčastěji se používá technika, při které se kladou dvě svarové housenky na jednu vrstvu svaru. Housenky se kladou střídavě směrem k jedné a druhé svarové hraně. Toto uspořádání se volí pro lepší odstranitelnost strusky z povrchu svaru. V ideálním případě se struska odstraní samovolně. Dalším způsobem je jednohousenková technika. Při této metodě klademe jednu housenku na střed svarového úkosu. Při tomto způsobu je důležité přesné vedení svařovacího drátu středem úkosu. Malá šířka svařovací hubice a také správné svařovací parametry.



Obr. 2.7. Schéma svařování do úzké mezery [8]

Při svařování středních hloubek je vhodné volit geometrii úkosu se zkosenými hranami, ale se zmenšeným úhlem rozevření a menším průřezem úkosu. [11]

2.6.2. Úprava začátků a konců housenek a oprava vad v průběhu svařování

Zvětšením svařovaných tlouštěk a zúžením svarových úkosů se objevila celá řada problémů při mechanické úpravě začátků a konců svarových housenek, eventuálně při výběru vad vzniklých v průběhu svařování a jejich opravě. Opravy jsou rozděleny do dvou základních skupin, přizpůsobených možnosti opravy. Jedná se o opravy v průběhu svařování a dále opravy objemných vad po svaření a tepelném zpracování. Během svařování lze opravovat

pouze vady, které se dají zjistit vizuálně a opravit automatem. Především jde o zapálení do stěny svarové hrany, nedolití housenky ke stěně, póry v housence, chybně položenou housenku a „zmrzlý drát“ v případě náhlého přerušení svařovacího procesu. Opravy vadných míst se musí dělat nástroji, které svým rozměrem a možností manipulace vyhovují pro použití v úzkém úkosu. V současné době existuje řada různě upravených ručních brusek a rotačních pilníků, které však ve většině případů nesplňují požadavky kladené na zařízení pro vybírání vad. Ruční opravy obalenou elektrodou ve velkých hloubkách prakticky není možná.

Lokální výbrus se musí opravovat vyrovnávacími housenkami automatem pod tavidlem. Svařování vyrovnávacích housenek pomocí klasické rovné hubice pouhým přiblížením ke stěně je možné pouze do hloubky výbrusu max. 5 mm. Při větších hloubkách je nutné používat na opravu speciální hubice. Na rozdíl od normálního svařování se drát naklání směrem k boku stěny zahnutým koncem hubice, přičemž vedení v blízkosti stěny je zajišťováno vodícími kladkami, odizolovanými od vlastní hubice.

Jestliže vadu v průběhu svaření nelze opravit a nebo je zjištěna až defektoskopickými kontrolami, využívá se druhé skupiny, a to opravy vady v hotovém svarovém spoji. Na tyto opravy je zapotřebí speciálního nářadí, především fréz, aby výběry, zejména jsou-li vady ve větších hloubkách, nebyly příliš velké. Tvar výběru je potom nutno přizpůsobit metodě opravy (ruční nebo automatová) a její proveditelnost by měla být prokázána zkouškou na maketě. [2], [6], [11]

Pro náročnost oprav je třeba vadám ve svarech předcházet dodržováním technologické kázně a údržbou svařovací techniky a jejího příslušenství. [10]

2.6.3. Výhody svařování do úzké

mezery pod tavidlem

- vysoká produktivita, při svařování do klasického úkosu vyžaduje velký objem roztaveného materiálu, nutného k zaplnění svarového úkosu. Úzkomezerovým svářením se oproti klasickému úkosu zmenší objem o 30 až 60%
- se zvětšujícím se objemem svarového kovu narůstá spotřeba drahých přídavných materiálů, které při úzko mezerovém svařování ušetříme
- při této metodě se také sníží spotřeba el.energie o 20 až 50%, z důvodu zmenšení úkosu a tím i pracnosti a časové náročnosti. Další 10 až 30% energie se uspoří zkrácením času předehřevu a odstraněním nutnosti mezižihání
- snížení počtu housenek přináší i snížení deformace a napětí ve svarku
- dosažení větší homogenity po celé



Obr. 2.8. Svařování do úzké mezery v praxi [34]

hloubce svarového spoje. Spoj se vyznačuje malým tepelným ovlivněním základního materiálu

- úprava úkosu je oproti standardním úkosům jednodušší a tím i méně nákladná
- úzkomezerové svařování výrazně rozšiřuje možnosti automatizace. Při klasickém úkosu je automatizace obtížná z důvodu změny polohy svařovací hubice a parametrů svařování
- díky svojí jednoduchosti nemá tato technologie velké nároky na kvalifikaci obsluhujícího personálu
- celkově se úspori 20 až 60% strojního času [2], [6], [11]

2.6.4. Nevýhody svařování do úzké mezery pod tavidlem

Při svařování pod tavidlem do úzké mezery je třeba speciálního zařízení. Svařovací hubice musí být odolné proti přehřátí tím i proti poškození. To je zajištěno vnitřním vodním chlazením. Při svařování je nutné uvažovat s možným dotykem hubice o svařovaný materiál, proto je svařovací hubice odizolovaná. Jinak by hrozilo nebezpečí zkratu. Izolace může být tvořena plazmovým nástřikem povlaku oxidů na funkční část hubice. Pro větší hloubky je výhodné použít elektricky odizolované nerezové pouzdro, v kterém jsou zabudovány funkční části hubice.

Pro svařování do úzké mezery se oproti klasickému svařování pod tavidlem změnil tvar násypky pro svařovací tavidlo. Ta se upravuje zúžením, pro lepší dopravu tavidla k místu svařování.

I přes tyto úpravy na zařízení je svařování do úzké mezery ekonomicky výhodné. Tyto drobné úpravy na zařízení se velmi rychle vrátí. Také se zvyšuje kvalita práce a výrazně se zlepšují pracovní podmínky svářečských pracovníků.

2.7. Tavidla

Tavidlo je prášek anorganického původu vhodné zrnitosti a chemického složení. Teplem oblouku se část tavidla taví. Tato roztavená část posléze vytvoří na svaru strusku, kterou je třeba odstranit. Aby byl zhotoven svar požadované kvality, musí tavidlo plnit tyto funkce:

- ochrana svarové lázně před nepříznivými vlivy vzduchu
- zajistit klidné hoření elektrického oblouku vytvořením dokonale ionizované atmosféry plynové kapsy el. oblouku
- ovlivňovat vytvoření a formování svaru
- metalurgicky působit na chemické složení svarového kovu a to především dobrou dezoxidací svarového kovu a zabezpečení nízkého obsahu nečistot ve svarovém kovu. Dále podporou dobrého přechodu legujících prvků z přídavného materiálu, případně tavidla do svarového kovu.

Vlastnosti tavidel závisí zejména na jejich chemickém složení. Jejich hlavními složkami jsou oxidy, které mohou být zásadité (CaO , MgO , MnO , K_2O , Na_2O), kyselé (SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2) a amorfní (Al_2O_3).

Na výrobu tavidel se jako suroviny používají rudy, keramické materiály a ferolegury (křemičitý písek, vápenec, feromangan, pálený magnezit, oxid hlinitý, dolomit, kazivec). Tyto suroviny se nejprve rozdrtí, v určitém poměru se důkladně namíchají a dále se zpracovávají tavením či spékáním. [2], [6], [12], [13]

2.7.1. Dělení tavidel

a) podle způsobu výroby

- tavná: získávají se tavením suchých směsí v pecích a následným odléváním do vody. Na povrchu zrnka chladnou rychleji. Akumulované teplo uvnitř zrnka dokonale zrnko vysuší. Výhodou těchto tavidel je jejich rovnoměrnější složení a stabilnější vlastnosti.
- keramická: získáváme je spojením práškové směsi pomocí pojiv. Do promíchané nadávkované směsi se přidá pojivo, většinou vodní sklo. Vzniklá hmota se granulíje protlačením přes síto s následným sušením. Tato tavidla se používají pro svařování legovaných materiálů. Legující prvky lze přidat do tavidla při jeho výrobě nebo při svařování. Nevýhodou je velká drobnost a nerovnoměrnost složení.
- spěkaná: jejich výroba je obdobná jako u keramických tavidel, s tím rozdílem že se prášková směs spojuje žíháním za současného působení tlaku při teplotě přesahující 800°C.
- aglomerovaná: výroba probíhá stejně jako u spěkaných jen bez působení tlaku.

b) podle struktury

- sklovitá: jsou lesklá, částečně průsvitná, různých barev podle složení tavidel. Lépe chrání svarovou lázeň před přístupem vzduchu.
- pemzovitá: jejich zrnka jsou matného vzhledu se zvrásněným povrchem. Jsou silně hydrofobická, proto je musíme chránit před vlhkostí.

c) podle chemického složení - dělí se podle obsahu hlavních složek v tavidle

- křemičitá - nízkokřemíková (< 35 % SiO_2)
 - vysokokřemíková (35 - 55 % SiO_2)
 - bezkřemíková
- manganová - bezmanganová (< 5% MnO)
 - nízkomanganová (5 - 20 % MnO)
 - středněmanganová (20 - 32 % MnO)
 - vysokomanganová (32 - 46 % MnO)
- fluoridová - bezfluoridová
 - nízkofluoridová (< 10 % fluoridů)
 - středněfluoridová (10 - 40 % fluoridů)
 - vysokofluoridová (> 40 % fluoridů)

d) podle metalurgického působení - na toto rozdělení má zásadní vliv obsah zásaditých či kyselých složek v tavidle. Určující je součinitel kyselosti K

$$K = \frac{\text{kyselé složky}}{\text{zásadité složky}} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2}{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}} \quad [-] \quad (2.1.)$$

Vyhodnocení součinitele kyselosti

$K = (0,9 - 1)$	=> neutrální tavidlo
$K > 1$	=> kyselé tavidlo
$K < 1$	=> zásadité tavidlo

e) podle použití

- tavidla na svařování uhlíkových ocelí: jsou to kyselé, neutrální nebo bazická tavidla s velkým obsahem kyslíčků manganu a křemíku
- tavidla na svařování legovaných ocelí: zpravidla jsou zásaditá s vysokým obsahem fluoridů a bezkyslíková
- tavidla na navařování legovanými přídavnými materiály: jsou většinou kyselé s nízkým obsahem MnO

f) podle zrnitosti

velikost zrna a jeho geometrický tvar má vliv na vlastnosti svarové housenky. Při větší zrnitosti je housenka při menší hloubce průvaru širší, jak při svařování s jemnozrnným tavidlem. Na tvorbu svarové housenky má vliv i větší rozdíl zrnitosti tavidla. Zrnitost tavidla se pohybuje od 0,25 do 2 mm. [6], [30]

2.7.2. Index bazicity

Zásaditost tavidla má vliv na kvalitu svarového kovu, jeho plastické vlastnosti nebo obsah kyslíku ve svaru.

Nejčastějším vztahem pro vyjádření zásaditosti je vztah 2.2. , který formulovali Tulia, Borniszewski a Baton. Tímto indexem se hodnotí metalurgické resp. redukčně oxidační působení tavidel. Index zásaditosti BI klasifikuje svářecí tavidlo, nikoliv však metalurgické reakce při svařování pod tavidlem. Čím vyšší je hodnota BI tím je tavidlo více zásadité. Tento index je zejména vhodný pro porovnání tavidel.

$$BI = \frac{\%Ca + \%MgO + \%BaO + \%K_2O + \%Na_2O + \%Li_2O + \%CaF_2 + \frac{1}{2}(\%MnO + \%FeO)}{\%SiO_2 + \frac{1}{2}(\%Al_2O_3 + \%TiO_2 + \%ZrO_2)}$$

(2.2.)

Je-li index bazicity B<1 jedná se o kyselé tavidlo
 B~1 jedná se o neutrální tavidlo
 B>1 jedná se o bazické tavidlo
 B>>1 jedná se o vysoce bazické tavidlo

[13], [17], [29]

2.7.3. Tavidla do úzkého úkosu

Tavidlo má významný vliv na kvalitu svarového spoje a musí splňovat specifické požadavky. Základním předpokladem tavidla je snadné nebo samovolné uvolnění strusky ze svarové housenky. To závisí na vzájemném působení tekutého tavidla a ztuhlého svarového kovu. Kysličníky železa, které tvoří povlak na povrchu housenky mají stejnou atomovou mřížku jako železo, proto ulpí na povrchu housenky. Pokud i tavidlo obsahuje prvky krystalizující ve stejné mřížce jako kysličníková vrstva, ztuhlá struska přilne na povrch housenky a velmi obtížně se odstraňuje. Vyšší obsah V, Cr a Al v tavidle zhoršuje odstranitelnost strusky. Svářecí tavidla musí i za vysokých teplot přehřevu zabezpečovat vytvoření tenké struskové kůry. Její odstranitelnost je obtížnější se zvyšující se teplotou přehřevu. Nejdůležitějším faktorem při odstranitelnosti strusky je rozdílný koeficient tepelné roztažnosti resp. smrštivosti strusky a svarového kovu. Nejvýhodnějším tavidlem pro snadnou odstranitelnost strusky je tavidlo na bázi Al_2O_3 s vyšším obsahem fluoridů. Toto tavidlo během chladnutí příčně popraská a rozdrobí se. [6], [11], [12], [30]

Svařování v úzkém úkosu probíhá pod relativně velkou vrstvou tavidla. To nepříznivě působí na hoření oblouku a unikání plynů ze svaru. Tyto aspekty mohou mít za následek vytvoření hrbolaté strusky nebo i nerovnoměrné a hrbolaté tvoření svarové housenky. Kromě toho může být také příčinou plynových dutin na povrchu svaru nebo pórovitosti housenky. [12]

2.8. Přídavné materiály

Jako přídavných materiálů se používá svařovacích drátů, trubiček a pásků. Nejvíce jsou používány svařovací dráty a to od průměru 1,5 do 5 mm. Vyjimečně je použito i větších průměrů. Drát je vyroben tažením za studena, má proto lesklý povrch. Někdy je povlakován měděnou vrstvičkou z důvodu zabránění koroze drátu.

Trubičkové elektrody jsou vytvořeny svinutým pláštěm z měkké oceli a mají uvnitř prášek, kterým je možné ovlivňovat chemické složení svaru. Oproti svařovacím drátům je hospodárnější. Nevýhodou je větší propal legur.

Volbu přídavného materiálu pro svařování daného základního materiálu určuje jeho chemické složení. Většinou není vhodné používat drát o stejném chemickém složení jako je základní materiál. Je to způsobeno rozdílnými činiteli, které mají vliv na vlastnosti svarového kovu v porovnání se základním materiálem. Těmito činiteli jsou zbytková napětí ve svarovém kovu, propal legujících prvků a hrubozrná lící struktura svarového kovu se sklonem k malému promísení.

Svarový kov musí obsahovat přísady ovlivňující zjemnění primární struktury, aby se svarový spoj již nemusel dále normalizačně žíhat. Kromě toho je třeba brát zřetel na zbytková napětí, proto by měl mít spoj značnou plastickou rezervu a dostatečně vysoké hodnoty vrubové houževnatosti. Je třeba brát na zřetel i velké promísení, které při tomto svařování vzniká. Může se být v rozmezí 50 až 70 %.

Volba svařovacího materiálu musí být cílena na finální složení svarového kovu a ten se musí blížit co nejvíce základnímu svařovanému materiálu. [8], [27], [32]

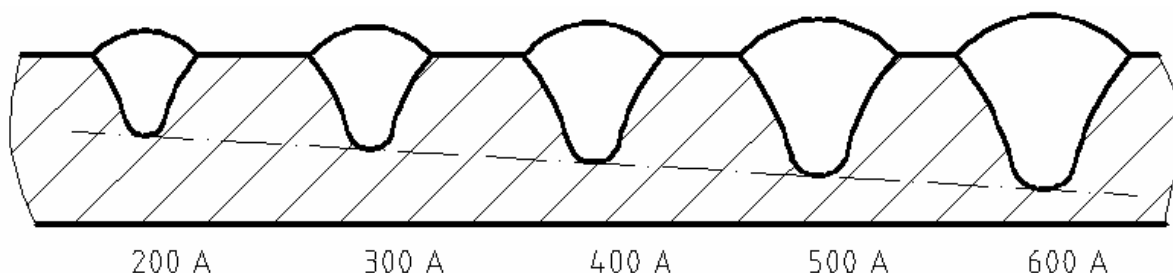
Pro svařování žárupevných ocelí se používají drátové elektrody legované molybdenem a chromem. Pro korozivzdorné oceli se používají elektrody s nízkým obsahem uhlíku stabilizované niobem. Pro svařování ocelí s vyšším obsahem uhlíku se používají elektrody legované molybdenem. Pro jemnozrné konstrukční oceli se používají přídavné dráty s obsahem 1 až 2 % Ni, ten zjemňuje primární strukturu a zlepšuje vrubovou houževnatost. [29], [32], [33]

2.9. Volba svařovacích parametrů

Při volbě hodnot svařovacího proudu, napětí a rychlosti sváření, je třeba postupovat tak, aby byly v souladu s tloušťkou a typem svařovaného materiálu, vzhledem na průměr drátu a techniku ukládání vrstev. Při volbě parametrů je důležité přihlédnout k použití sváření střídavým nebo stejnosměrným proudem. [11]

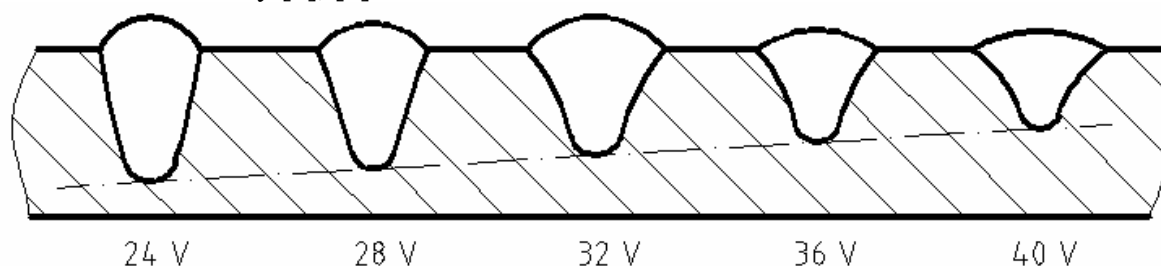
Pro získání kvalitních svarů je důležité kontrolovat tyto parametry procesu:

- proudová zátěž: je nejdůležitější parametr, který kontroluje rychlost jakou se taví elektroda a tedy depoziční rychlost, hloubku penetrace a podíl přetaveného základního materiálu. S narůstajícím proudem roste hloubka protavení a rychlost tavení kovu. Vysoký proud způsobuje nepravidelné hoření oblouku, neprůvary nebo úzký vysoký svar. Naopak nízký proud způsobuje nestabilní oblouk. Při vysokém svařovacím napětí se svařovací oblouk mezi elektrodou a svarovou lázní prodlouží, při nízkém se zkrátí. Napětí výrazně ovlivňuje tvar průřezu svarové vrstvy. [5]



Obr. 2.9. Vliv velikosti svařovacího proudu na profil svaru [2]

- svařovací napětí: je rozdíl potenciálu mezi povrchem roztaveného svarového kovu a špičkou svařovacího drátu. Při vysokém svařovacím napětí se svařovací oblouk mezi elektrodou a svarovou lázní zkrátí, při nízkém se prodlouží. Napětí výrazně ovlivňuje tvar průřezu svarové vrstvy [5], [2]



Obr. 2.10. Vliv velikosti svařovacího napětí na profil svaru [2]

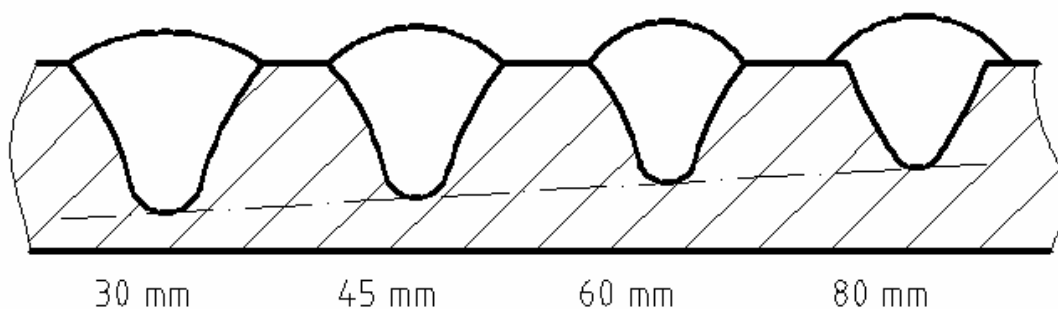
- rychlost svařování: při změně rychlosti ovlivňujeme i ostatní parametry. Měrný příkon roste se snižující se rychlostí svařování a naopak. Při klesající rychlosti svařování narůstá průřez svarové vrstvy a roste též jeho převýšení. Vhodná rychlost svařování by měla vyhovovat ostatním parametrům. Jako je hloubka protavení a průřez svaru. Vysoká rychlost svařování může vyvolat neprůvary, pórovitost a nepravidelný tvar svarové housenky. Naopak při nízké rychlosti vzniká konkávní tvar housenky a svar je náchylnější k praskání. Svar se také špatně formuje z důvodu velkého množství roztaveného kovu, který obtéká svarový oblouk. Pro vysoké rychlosti svařování je třeba speciálních tavidel, které tyto rychlosti umožňují.

- průměr elektrody: průměr elektrody má se svařovacím proudem vliv na tvar housenky a hloubku protavení. V Tab. 2.1. jsou uvedeny doporučené proudové zátěže pro různé průměry svařovacích drátů.

Průměr drátu [mm]	2,3	2,4	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4
Oblast proudu [A]	200-500	300-600	300-800	400-900	500-1200	600-1300	600-1600

Tab. 2.1. Doporučené proudové zátěže pro různé průměry svařovacích drátů [5]

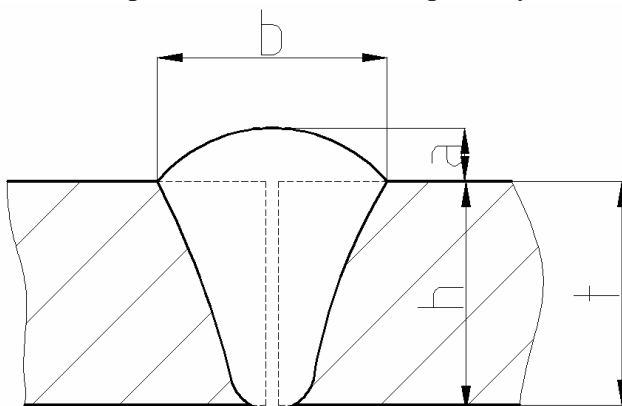
- výlet elektrody: je vzdálenost mezi koncem špičky elektrody a svařovaným povrchem. Obvykle se pohybuje v rozmezí 20 až 40 mm. Je důležitým faktorem při proudových hustotách nad $125 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$. Při větším výlet elektrody si hrot, vstupující do svaru, nezachovává přesnou polohu. Může oscilovat, což může mít vliv na přesnost vedení svaru. Maximální hodnota vyložení je pro průměr drátu 2,0 mm až 3,2 mm – 75 mm, pro průměr 3,2 mm až 5,6 mm – 125 mm.



Obr. 2.11. Vliv výletu drátu na profil svaru [2]

- šířka a výška vrstvy tavidla: optimální šířka tavidlové vrstvy musí zajistit klidné svařování. Příliš velká tloušťka tavidla způsobuje drsný povrch svaru, plyny nemohou totiž opustit povrch svaru. Velká vrstva tavidla vede také k ekonomickým ztrátám. Naopak při malé vrstvě tavidla, oblouk není úplně zakrytý struskou a dochází k lokálním výbojům a rozstříku. [5]

Všechny tyto parametry ovlivňují formu svaru viz Obr. 2.12. Na součinitel formy svaru ψ má vliv chemické složení, mechanické vlastnosti a struktura svarového spoje. Významný vliv na rozměry svaru má množství uvápněného tepla v elektrickém oblouku, které je funkcí svářecího proudu, svařovacího napětí a rychlosti svařování. [8]



Obr.2.12. Charakteristické rozměry svaru [8]

$$\psi = \frac{b}{h} [-] \quad (2.3.)$$

ψ ...součinitel formy svaru [-]
 apřevýšení [mm]
 b ...šířka svaru [mm]
 ttloušťka materiálu [mm]

2.10. Svařitelnost

Je složitý pojem, ovlivněný celou řadou aspektů. Zahrnuje vliv materiálu, použité technologie a konstrukce svaru.

a) vlastnosti základního svařovaného materiálu a svarového kovu:

- chemické složení
- mechanické vlastnosti
- mikrostruktura
- absorpce plynů
- oxidační schopnost
- vlastnosti a chování za vysokých teplot
- chování při rychlém ohřevu
- chování při velkých rychlostech ochlazování
- transformace struktury
- precipitační vytvrzování
- náchylnosti na vznik trhlin
- metalurgické reakce mezi svarovým kovem a struskou, nebo ochranou atmosférou

b) použitou metodou svařování a výrobními podmínkami:

- tavné nebo tlakové svařování
- množství tepla vneseného do svarového spoje
- parametry svařování
- příprava a čistota svarových ploch
- dokonalost ochrany místa svaru
- průměry použitých přídavných materiálů
- přístup ke svaru
- poloha svaru
- předehřev svaru
- teplota Interpass
- tepelné zpracování
- prokovování svarových housenek
- způsob kladení svarových housenek
- pořadí provádění svarů

c) konstrukcí svařence

- počet svarů na konstrukci
- typy použitých svarů
- umístění svarů na konstrukci
- kumulace svarových spojů na konstrukci
- tloušťka svarových spojů
- tuhost svařované konstrukce
- zbytková napětí
- deformace svařence
- konstrukční vruby v blízkosti svarů
- náhlé přechody tloušťek v blízkosti svarů

Definice svařitelnosti podle ISO: „Kovový materiál se považuje za svařitelný do určitého stupně při daném způsobu svařování a pro daný účel, lze-li odpovídajícím technologickým postupem svařování dosahovat kovové celistvosti svarových spojů tak, že tyto spoje vyhovují

technickým požadavkům, jež se týkají jak vlastností samostatných spojů, tak i vlivu těchto spojů na konstrukční celek, jehož součástí tyto spoje jsou.“ [1]

2.10.1. Vliv chemického složení na svařitelnost ocelí

Uhlík

Ovlivňuje rozhodujícím způsobem svařitelnost. S rostoucím obsahem uhlíku v oceli se také zvyšuje hodnota tvrdosti martenzitu, který vzniká při velkých rychlostech ochlazování ve svarovém spoji.

Mangan

Zvyšuje mez kluzu a mez pevnosti. Působí jako dezoxidační prvek. Pomocí manganu se dá snížit obsah síry v oceli, protože se síra váže na mangan a tvoří MnS.

Křemík

Je silně dezoxidační, v nelegovaných nízkouhlíkových ocelích zvyšuje pevnost feritu. Jeho obsah v oceli je omezen hranicí 0,45 %.

Nikl

Zvyšuje plastické vlastnosti a prokalitelnost. Ve vysokolegovaných Cr-Ni austenitických ocelích zajišťuje s ostatními prvky austenitickou strukturu. Patří mezi nejdražší přísady.

Fosfor

Spolu s mědí zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi. Zvyšuje mez pevnosti a mez kluzu. Snižuje plasticitu za studena. Způsobuje zkřehnutí tuhého roztoku α .

Měď

Při obsahu 0,15 až 0,50 % zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi, tím že na povrchu vytvoří těsnou nepropustnou oxidickou vrstvičku. Dostává se do oceli s použitým šrotem během prvotní výroby oceli.

Chrom, molybden, vanad

Precipitují do karbidů Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , Mo_2C , V_4C_3 a tím výrazně zpevňují oceli i svarové kovy. Se zvyšujícím se obsahem chromu vzrůstá korozivzdornost oceli.

Uhlíkový ekvivalent: vyjadřujeme jím vliv chemického složení na svařitelnost. Vyjadřuje riziko kalitelnosti od jednotlivých legujících prvků. Čím je hodnota uhlíkového ekvivalentu vyšší tím je svařitelnost dané oceli obtížnější.

Podle ČSN 05 1310 se uhlíkový ekvivalent počítá:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot s \quad [\%] \quad (2.4.)$$

s = tloušťka materiálů [mm]

rovnice platí pro materiály jejichž složení nepřesáhne toto složení

C = 0,22 %

Mn = 1,6 %

Cr = 1,0 %

Ni = 3,0 %

V = 0,14 %

Cu = 0,30 %

Mezinárodní svářečský institut navrhl vzorec pro oceli s obsahem C do 0,25 %, tento vztah se používá pro nelegované, jemnozrnné a nízkolegované oceli

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%] \quad (2.5.)$$

Pro oceli s obsahem C do 0,16 % navrhli vzorec Ito a Bessyo:

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5.B \quad [\%] \quad (2.6.)$$

Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu pro feritické oceli doporučuje norma ČSN EN 1011-2 vztah:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\%] \quad (2.7.)$$

Rozhodujícím kritériem je pro vyhodnocení uhlíkového ekvivalentu hodnota 0,45.

Pokud je uhlíkový ekvivalent větší jak tato hodnota jeho svařitelnost není zaručena a je třeba přistoupit k technologickým úpravám svařovacího postupu. Zejména předehřevu případně tepelnému zpracování svarového spoje. [1], [31]

2.10.2. Teplota předehřevu

Předehřevem snižujeme riziko vzniku studených trhlin ve svarových spojích. Předehřev snižuje rychlost ochlazování svaru a tím se zabránuje zakalení TOO svarového spoje a svarového kovu. Umožňuje vznik struktur příznivějších z hlediska difuze vodíku. Prodlužuje čas, po který může vodík difundovat ze svarového kovu. Snižuje teplotní gradienty ve svaru a tím přispívá ke snížení zbytkových napětí, vyvolaných svařováním.

Teplotu předehřevu je možné stanovit podle ARA diagramů nebo výpočtem podle empirických rovnic sestavených na základě statistického vyhodnocení zkoušek praskavosti, nebo dlouhodobých praktických zkušeností. Tyto vypočtené teploty platí pro svařování v prostředí nad 0°C. Při svařování pod touto teplotou je potřeba teplotu předehřevu zvýšit.

Teplota předehřevu se měří na opačné straně než je strana nahřívání. Čas potřebný k vyronání teploty je alespoň dvě minuty na každých 25 mm tloušťky.

Výpočet teploty předehřevu:

Důležitým parametrem pro stanovení teploty předehřevu je teplo vnesené do svaru, které se stanoví výpočtem:

$$Q_s = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2.8.)$$

Q_s = množství tepla přivedené do svarového spoje na jednotku jeho délky [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]

η = koeficient tepelné účinnosti, pro metodu 121 $k = 1,0$ [-]

U = napětí při svařování [V]

I = intenzita svařovacího proudu [A]

v = rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

1) podle Seferiana – výpočet je vhodný pro uhlíkové, nízkolegované a žárovečné Cr-Mo oceli s obsahem C do 0,1%

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.9.)$$

$$C_p = C_c + C_s \quad (2.10.)$$

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad (2.11.)$$

$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c \quad (2.12.)$$

C_c ...ekvivalentní uhlík [%]
 s ...tloušťka materiálu [mm]

2) podle Ita a Bessya

$$T_p = 1440 \cdot P_w - 392 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.13.)$$

$$P_w = P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{HD}{40 \cdot 10^4}$$

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2.14.)$$

$$K = K_0 \cdot s$$

HD = obsah difuzního vodíku, stanovený glycerinovou zkouškou [ml.100g⁻¹]

K = intenzita tuhosti spoje [-]

K₀ = koeficient, pro tupý spoj K₀ = 0,69 [-]

s = tloušťka materiálu [mm]

3) podle ČSN EN 1011-2

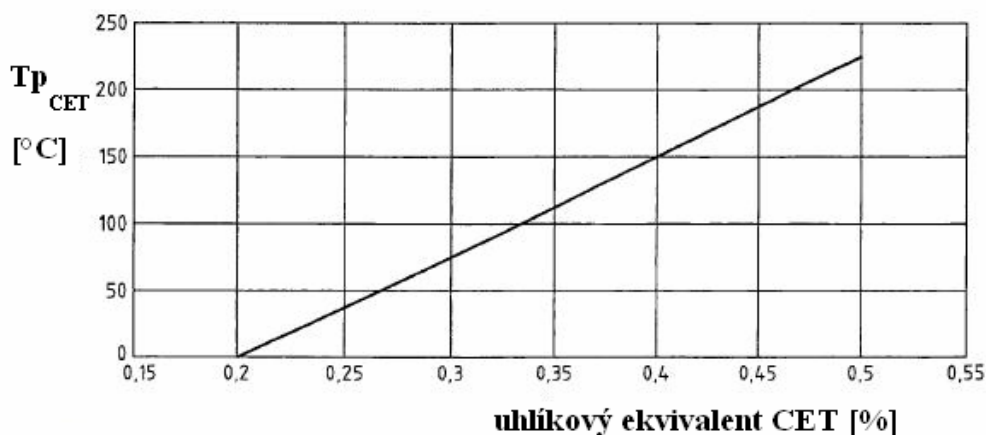
- tato metoda je spjata se vztahem výpočtu uhlíkového ekvivalentu CET, používá se pro eliminaci vodíkového praskání. Rovnice platí pro oceli s R_m do 1000 MPa a CET = (0,2 až 0,5) %.

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q_s - 328 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.15.)$$

$$- \text{nebo také } T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.16.)$$

T_{pCET} zahrnuje vliv chemického složení kovu

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.17.)$$



Obr. 2.13. Teplota přehřevu v závislosti na uhlíkovém ekvivalentu CET [30]

T_{pd} zahrnuje vliv tloušťky svařovaných materiálů

$$T_{pd} = 160 \cdot C \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.18.)$$

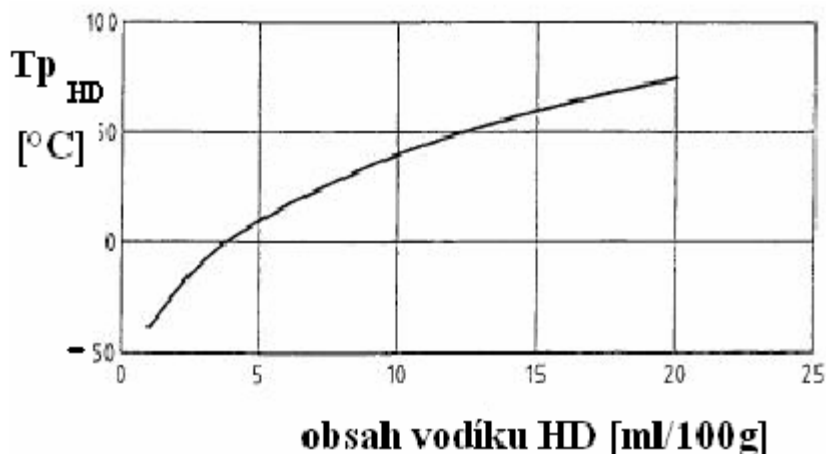
d... tloušťka svařovaných materiálů [mm]

T_{pHD} zahrnuje vliv obsahu difuzního vodíku HD [ml.100g⁻¹] ve svarovém Kovu

$$T_{pHD} = 62.HD^{0,35} - 100 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.19.)$$

$$T_{pQ} \text{ zahrnuje vliv tepelného příkonu } Q \quad [\text{kJ.mm}^{-1}]$$

$$T_{pQ} = (53.CET - 32).Q - 53.CET + 32 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.20.)$$



Obr. 2.14. Teplota předehřevu v závislosti na obsahu vodíku HD ve svarovém kovu [30]

Teploty předhřevu stanovují normy nebo jsou stanoveny experimentálně. [1]

2.10.3. Další důležité teploty při svařování

Ti – teplota interpass – teplota vícevrstvého svaru a přiléhajícího základního materiálu bezprostředně před aplikací další svarové housenky. Obvykle se uvádí jako maximální teplota.

Tm – teplota ohřevu – minimální teplota v oblasti svaru, která musí být udržovaná v případě přerušení svařování.

Teplota interpass musí být měřena na svarovém kovu nebo v jeho bezprostřední blízkosti. Teplota ohřevu musí být měřena v průběhu přerušení svařování. [1]

2.11. Svařitelnost energetických zařízení

Svarový spoj pracující za teplot nad 350 °C je nutné dodržet postup zaručující stabilní svarový spoj za vysoké pracovní teploty. Technologický postup svařování musí respektovat důsledek tepelně aktivovaných dějů, které se projevují především difúzí uhlíku za vzniku oduhličeného a nauhličeného pásma. Toto vyvolává mechanické, fyzikální a chemické změny vlastností. Svarový spoj musí být navržen tak, aby za pracovní teploty koeficient difúze uhlíku svarového spoje D_{Cef} byl nižší než $10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ což je mezní hodnota strukturní stability během jeho životnosti. U energetických zařízení je důležitý také koeficient tepelné roztažnosti svarového kovu, který musí být blízký základnímu materiálu. [34]

Složitějším problémem z hlediska provozní spolehlivosti je svařitelnost různých rotorových feritických žárupevných ocelí nestejného chemického složení. Např. ocel 2,25 CrMoV spolu s 14 Cr- MoVNNbN10-1. V případě, že je svarový spoj tepelně zpracován a pracuje dlouhodobě za teploty 600 °C. Z provedených zkoušek vyplynulo, že v přímém styku uvedených ocelí je v přechodu na straně oceli s 12 hmot. % Cr obsah uhlíku v nauhličeném

pásmu po žíhání spoje za teploty 690 °C po dobu 10 h 1,4 hmot % C, ale při provozu za teploty 600 °C po dobu 150.000 h se obsah uhlíku zvýší na 2 hmot. % s tím, že se podstatně zvýší na straně níže legované oceli šířka oduhličeného pásma z 0,17 na 6,80 mm viz. PŘÍLOHA 1. Je – li to možné umístíme spoj do méně namáhaných míst konstrukce. [34]

2.12. Heterogenní svarové spoje

Při svařování ocelí rozdílného chemického složení nebo rozdílných strukturních fází dochází vždy k degradaci jednoho nebo obou svařovaných materiálů. Důvodem je vznik netavné zóny v přechodové oblasti. Ta má rozdílné chemické složení a tím i degradované mechanické a fyzikální vlastnosti.

Při dlouhodobém provozu zařízení za vyšších teplot nebo při tepelném zpracování probíhá mezi základním materiálem a svarovým kovem difuzní pochody uhlíku. Ty jsou zdrojem oduhličených a nauhličených pásem, která mají degradované vlastnosti, tím se snižuje spolehlivost, bezpečnost a životnost zařízení nebo konstrukce. [7]

2.12.1. Schaefflerův diagram

Tento diagram (Obr. 2.15.) slouží k odhadnutí výsledného složení svarového kovu. Pomocí tohoto diagramu lze také vhodně zvolit přídatný materiál pro svařování rozdílných materiálů. Vhodnou volbou chceme dosáhnout složení svarového spoje, ve kterém se nebudou vyskytovat žádné vady.

Na vodorovné ose je chromový ekvivalent Cr_E , který zahrnuje feritotvorné prvky Cr, Mo, Si, W. Tyto prvky rozšiřují oblast feritu (železo alfa). Na svislé ose se nachází niklový ekvivalent Ni_E , který zahrnuje austenitotvorné prvky Cu, Ni, Mn. Tyto prvky svojí vzrůstající hodnotou rozšiřují oblast austenitu (železo gama). Výrazy pro výpočet Cr_E a Ni_E se podle různých autorů liší:

Schaeffler:

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5.Si + 0,5.Nb \quad [\%] \quad (2.21.)$$

$$Ni_E = Ni + 30.C + 0,5 Mn \quad [\%] \quad (2.22.)$$

Delong:

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5.Si + 0,5.Nb \quad [\%] \quad (2.23.)$$

$$Ni_E = Ni + 30.C + 0,5 Mn + 30.N \quad [\%] \quad (2.24.)$$

Hull:

$$Cr_E = Cr + 1,21.Mo + 0,48.Si + 0,14.Nb + 2,27.V + 0,72.W + 2,20.Ti + 0,21.Ta + 2,48.Al \quad [\%] \quad (2.25.)$$

$$Ni_E = Ni + 22.C + 0,31.Mn + 14,2.N + Cu \quad [\%] \quad (2.26.)$$

Siewert:

$$Cr_E = Cr + Mo + 0,7.Nb \quad [\%] \quad (2.27.)$$

$$Ni_E = Ni + 35.C + 20.N + 0,25.Cu \quad [\%] \quad (2.28.)$$

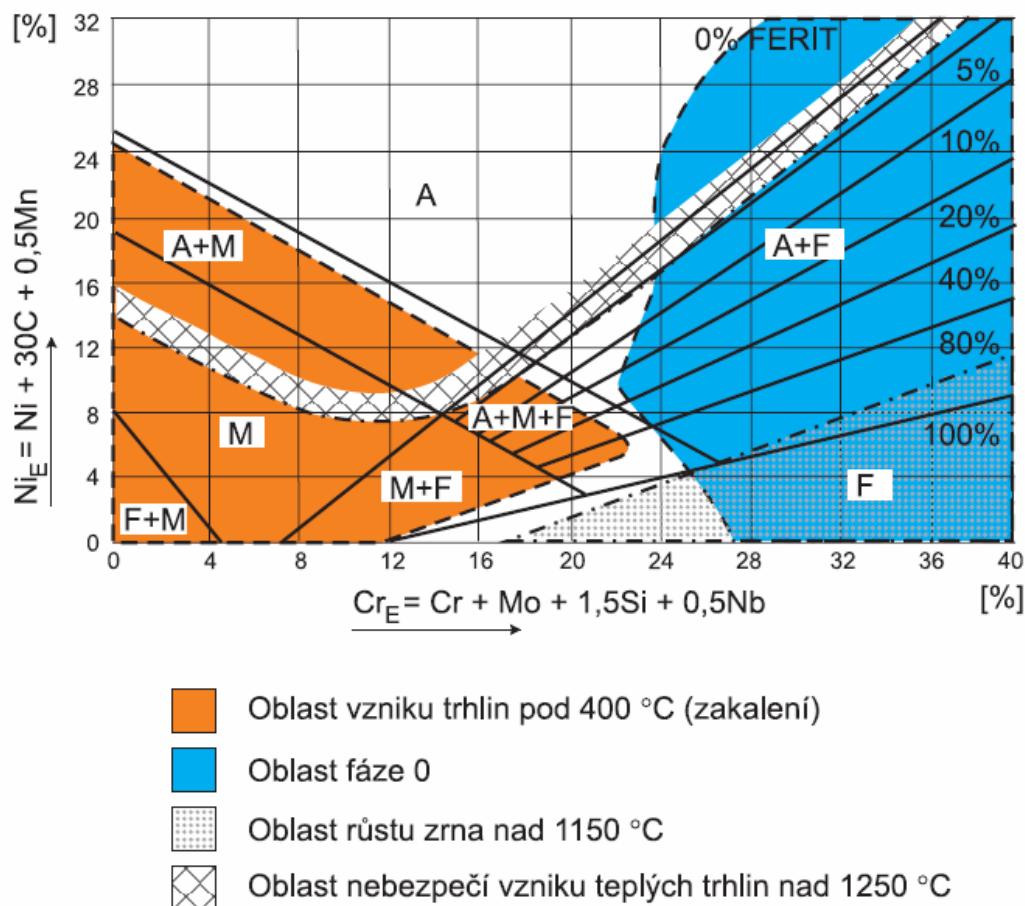
Suutal a Mioso:

$$Cr_E = Cr + 1,37.Mo + 1,55.Si + 2.Nb + 3.Ti \quad [\%] \quad (2.29.)$$

$$Ni_E = Ni + 22.C + 0,3 Mn + 14,2.N + Cu \quad [\%] \quad (2.30.)$$

Nejkomplexnější výraz je podle Hulla, poslední upřesnění provedl Siwert. Pro praxi stačí základní vztah podle Schaefflera.

Složení svarového kovu lze z diagramu získat také graficky. U heterogenních spojů je třeba znát promísení materiálů ve spoji. [5]



Obr. 2.15. Schaefflerův diagram [36]

2.12.2. Proces svařování

K poruchám heterogenních svarových spojů dochází při cyklickém tepelném namáhání z důvodu rozdílných součinitelů tepelné roztažnosti základního materiálu a svarového kovu. K poruše dojde v přechodu mezi nauhličenou a oduhličenou částí. Proto je třeba volit přídatný materiál tak, aby byl vznik oduhličeného a nauhličeného pásma potlačen na minimum.

Jestliže svarový spoj pracuje do teploty 350°C, svařujeme austenitickými elektrodami. Ty poskytují plastický svarový kov s vysokou houževnatostí. Většinou se svařuje bazickými elektrodami pro nízké nalegování svarového kovu.

Pro spoje pracující za teploty vyšší jak 350 °C se používají přídatné materiály s vyšším obsahem niklu. Svarový kov potom tvoří bariéru proti difuzi uhlíku.

Při svařování materiálů s různými strukturálními bázemi a velkých tlouškách se užívá přídatného materiálu s vysokým obsahem niklu pro navaření protidifúzní bariéry na straně feritického materiálu. Na výplň svaru se pak použije přídatný materiál s nízkým obsahem uhlíku. Tato výplň lépe odolává studeným trhlinám.

Při navařování protidifúzní bariéry je třeba materiál předhřát, při svařování výplně austenitickým přídavným materiálem již předehřev nutný není.

3. Žárupevné materiály

Žárupevnost materiálu je soubor mechanických vlastností a materiálových charakteristik. Jedná se především o pevnost při tečení a pevnost při tepelné únavě. Dané vlastnosti musí žárupevný materiál splňovat i za pokojové teploty. Hlavním oborem použití je energetický průmysl, který se dynamicky rozvíjí a na materiály jsou kladeny vyšší nároky při stejné či nižší ekonomické náročnosti.

rozdělení žárupevných materiálů a jejich použití:

- uhlíkové oceli: obsah C do 0,2 %, použití do teploty 400 °C, dobrá svařitelnost, dobrá tvárnost, nízká cena
- nízkolegované oceli feriticko-perlitické s přísadou Cr, Mo, V: obsah legujících prvků celkem do 3%, použití do teploty 570 °C, zhoršená svařitelnost, mírně zvýšená odolnost proti korozi, žáruvzdornost do 570 °C
- chromové oceli (10-12 % Cr) s přísadami Mo, V, W: použití do teploty 600°C, dobrá korozivzdornost a žáruvzdornost do 650 °C, zhoršená svařitelnost, nižší vrubová houževnatost, příznivé vysoké tlumení za teplot provozu
- austenitické oceli Cr-Ni nevytvrditelné: teplota použití do 620 °C, používají se jen oceli stabilizované, všeobecně špatná svařitelnost, velký součinitel tepelné roztažnosti, malá tepelná vodivost, obtížná obrobitelnost
- austenitické oceli Cr-Mn s přísadou Mo: teplota použití do 620 °C, používají se jen oceli stabilizované, všeobecně špatná svařitelnost, velký součinitel tepelné roztažnosti, malá tepelná vodivost, obtížná obrobitelnost, nižší korozní odolnost proti Cr-Ni
- austenitické oceli Cr-Ni vytvrditelné, komplexně legované: teplota použití do 750 °C, používají se jen oceli stabilizované, všeobecně špatná svařitelnost, velký součinitel tepelné roztažnosti, malá tepelná vodivost, obtížná obrobitelnost [24]

3.1. Nízkolegované žárupevné oceli

Používají se v energetickém průmyslu na zařízení, kde teplota přesahuje 580 °C. Celosvětový trend snižování nákladů na materiál se nevyhnul ani energetické oblasti, proto byly vyvinuty materiály na bázi 2-3% Cr s obsahem C do 0,1 hm.%. Tyto materiály jsou legované W, Nb, B a Ti. Skutečného zvýšení kvality ocelí bylo dosaženo zvýšením obsahu dusíku na cca 0,09%. Žárupevné oceli tohoto složení dosahují při teplotách 550 – 575 °C obdobné žárupevnosti jako oceli s obsahem 9% Cr. [16], [23]

3.2. Mechanismy zpevnění a degradační procesy

Nejvýznamnějším mechanismem zpevnění je precipitační zpevnění a zpevnění tuhého roztoku. Za vyšších teplot probíhají degradační procesy, které vedou ke snížení precipitačního zpevnění nebo snížení zpevnění tuhého roztoku. [16]

3.2.1. Precipitační zpevnění

Jeho měřítkem je vzájemná vzdálenost částic sekundárních fází I. Tato vzdálenost závisí na počtu částic v jednotce objemu a středním průměru částic.

$$I_s = \frac{1}{2} (N_v \cdot d_s)^{\frac{1}{2}} - d_s \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \quad [\mu\text{m}] \quad (3.1.)$$

N_vstřední počet částic v jednotce objemu [-]

d_sstřední průměr částic $[\mu\text{m}]$

Při klesající vzdálenosti částic roste mez kluzu při pokojové teplotě a vzrůstá mez pevnosti při tečení a klesá rychlost tečení. [16]

V CrMoV ocelích se na precipitačním zpevnění podílejí zejména jemné částice karbonitridu vanadu, v ocelích CrMo se na precipitačním vytvrzení podílely karbidy Mo_2C a Cr_7C_3 .

3.2.2. Zpevnění tuhého roztoku

Jestliže se v tuhém roztoku nachází Mo a W výrazným způsobem se podílí na zpevnění tuhého roztoku. V případě, že při tepelném zpracování dochází k poklesu obsahu těchto prvků v tuhém roztoku klesá žárupevnost oceli. [16]

3.2.3. Degradací procesy

Hrubnutí je proces, při němž dochází k růstu velkých částic a rozpouštění malých částic sekundární fáze. Objemový podíl precipitátu se v průběhu procesu nemění. A to z důvodu růstu středního průměru částic a poklesu počtu částic v jednotce objemu, dochází tak ke zvětšování střední vzdálenosti částic a tím k poklesu precipitačního zpevnění. Z tohoto důvodu dochází ke snížení meze kluzu při pokojové teplotě.

Rozměrová stabilita částic karbidů a karbonitridů je hodnocena pomocí konstant rychlosti hrubnutí K_d , která vyjadřuje časovou změnu průměru částic.

$$d_s^3 - d_0^3 = K_d \cdot t \quad (3.2.)$$

d_sstřední průměr částic v čase t $[\mu\text{m}]$

d_0střední průměr částic v čase $t = 0$ $[\mu\text{m}]$

tdoba vysokoteplotní expozice [s]

Teplotní závislost konstanty hrubnutí K_d je dána rovnicí:

$$K_d = K_0 \cdot \exp\left[-\frac{Q}{RT}\right] \quad [-] \quad (3.3.)$$

Qzdánlivá aktivační energie hrubnutí [J.mol]

Ttermodynamická teplota [K]

Runiverzální plynová konstanta $[\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}]$

Poměr konstant rychlosti hrubnutí stanovený experimentálně při teplotě 600 °C, lze vyjádřit vztahem:

$$M_7C_3 : Mo_2C : V_4C_3 : V(CN), V(N) = 2204 : 44 : 18 : 1 \quad (3.4.)$$

Rychlost hrubnutí nitridu vanadu V(N) je prakticky stejná jako rychlost hrubnutí karbonitridu vanadu V(CN).

Výrazně lepší žárupevnost ocelí obsahující vanad lze vysvětlit pomalejším precipitačním zpevněním. Rychlost hrubnutí částic přispívající k precipitačnímu zpevnění CrMo oceli (Mo_2C a Cr_7C_3) je značně vyšší, než rychlost hrubnutí částic v CrMoV ocelích (V_4C_3 a $\text{V}(\text{CN})$). Naopak ke zhoršení žárovevých vlastností ocelí dochází s rostoucím obsahem Mo a W nad mez rozpustnosti při pracovní teplotě.[16]

3.3. Žárupevné vlastnosti svarových kovů

3.3.1. Vliv chyb na žárupevné vlastnosti svarových spojů

Pro všechna energetická zařízení je nejrizikovějším místem svarový spoj. Pro optimální konstrukci je třeba započítat vliv napěťových a teplotních faktorů. Samozřejmě, že na výslednou kvalitu zařízení mají vliv i chyby ve svarovém kovu, kterým se ale snažíme během svařovacího procesu předcházet.

Podle experimentu provedených podle [20] bylo zjištěno, že nejcitlivější oblast pro snížení žárupevnosti je tepelně ovlivněná oblast. Pro svarové spoje materiálu 15 128 svařované automaticky pod tavidlem bylo zjištěno snížení žárupevnosti v tepelně ovlivněné oblasti o 20 až 40 %.

Chyby ve svarovém spoji se projeví, jestliže je jejich vliv větší než žárupevnost nejslabší oblasti svarového spoje. Citlivost základního materiálu a svarového spoje na vruby je při vysokých teplotách závislá od jejich plastických vlastností a schopností vykompenzovat napěťové špičky. [20]

3.4. Svařitelnost ocelí s 2 až 3 % Cr

Se zvyšující se účinností energetických zařízení dosahované zvýšením teploty nad 600°C a tlaku páry nad 26 MPa byly vyvinuty nové oceli na bázi 2 až 3 % Cr dolegované Mo, V, Nb, N, B a W.

Snaha zlepšit svařitelnost vede ke snižování obsahu uhlíku a úsporným legováním Cr, Mo, V, W a B. To vede ke snížení uhlíkového ekvivalentu a tím i teploty předehřevu. Toto snižování legujících prvků na samotnou hranici žárupevnosti není ovšem optimální. Za optimální je považováno legování oceli Mo a W při splnění max. hodnoty Mo_{ekv} 0,5%. Při této hodnotě je zajištěno maximální možné zpevnění tuhého roztoku a je minimální nebezpečí degradace mikrostruktury vylučováním karbidů M_6C . Toto snížení by znamenalo ochuzení tuhého roztoku o Mo a tím i snížení žárupevnosti. Při snížení Mo_{ekv} a zároveň zvýšením obsahem vanadu se projeví zvýšením žárupevnosti především při zvýšených teplotách. Tyto úpravy chemického složení mají také příznivý vliv na snížení teploty předehřevu a tím snížení nákladů na svařovací proces.

$$\text{Mo}_{\text{ekv}} = \text{Mo} + \frac{1}{2}\text{W} \quad [\%] \quad (3.5.)$$

Mo_{ekv}ekvivalentní obsah molybdenu

Pro svařování těchto ocelí se doporučuje použít přídatný materiál o složení 2,5 až 3 % Cr, 1% Mo nebo přídatné materiály o složení 2,2 % Cr, 0,1 % Mo, 0,25 % V, 1,5 % W a Nb.

Se zvyšující se dobou provozu zařízení klesá tvrdost svarového spoje v tepelně ovlivněné oblasti až o 40%.

Po svaření se většinou u svarových spojů požaduje tepelné zpracování při teplotách 680 až 730°C . Tepelné zpracování se provádí z důvodu dosažení mikrostruktury a disperze

vytvrzujících částic ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti, která se bude co nejvíc blížit základnímu materiálu. [16]

3.5. Křehnutí ve svarovém spoji

Křehnutí je složitá funkce chemického složení, struktury, pevnostních charakteristik a působení vodíku při dané teplotě a napětí.

Vliv obsahu legujících prvků a nečistot se určuje dle Watanabeho faktoru, používaný na hodnocení náchylnosti na zkřehnutí pro oceli s 2,25 %Cr.

$$J = 10^4 \cdot (Mn + Si) \cdot (P + Sn) \quad [\%hm] \quad (3.6.)$$

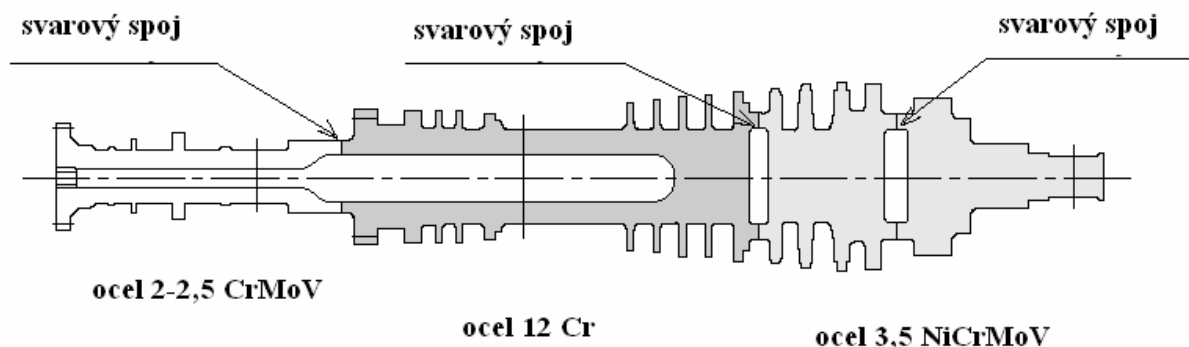
A Bruscatuv faktor na hodnocení náchylnosti křehnutí svarových spojů.

$$X = \frac{1}{100} \cdot (10 \cdot P + 5 \cdot Sb + 4 \cdot Sn + As) \quad [ppm] \quad (3.7.)$$

V materiálových specifikacích se např. na zařízení pro petrochemický průmysl uvádí hodnota X faktoru max. 20ppm a faktor J max. 180%. [18]

4. Zhodnocení současného stavu

V současné době zadavatelská firma SIEMENS vyrábí parní turbíny svařováním z několika dílů z různých materiálů. Tyto materiály se liší svým složením a tím i svými žárupevnými vlastnostmi. Použití více materiálů je dáno rozdílnými vstupními parametry parní turbíny. Proto je z ekonomických důvodů voleno více materiálů, které jsou následně svařeny viz. Obr. 4.1. Polotovarem pro výrobu rotoru je výkovek.



Obr. 4.1. Schéma parní turbíny od firmy SIEMENS

4.1. Používaná technologie TIG

V současné době zadavatelská firma SIEMENS turbomachinery svařuje rotory parních turbín metodu TIG. Touto metodou je svařován kořen i výplňová část svarku.

Princip technologie TIG:

Zkratka TIG je odvozena z angličtiny a to ze spojení Tungsten Inert Gas. V překladu to znamená svařování wolframovou elektrodou v ochranném inertním plynu (většinou argon). V odborné literatuře se občas vyskytuje pro tuto technologii název WIG. Znamená to tu samou technologii, jenom je tato zkratka vyvozena z německého jazyka (Wolfram Inert Gas). V USA je používaná zkratka pro tuto technologii GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). Číselné označení této metody je 141.

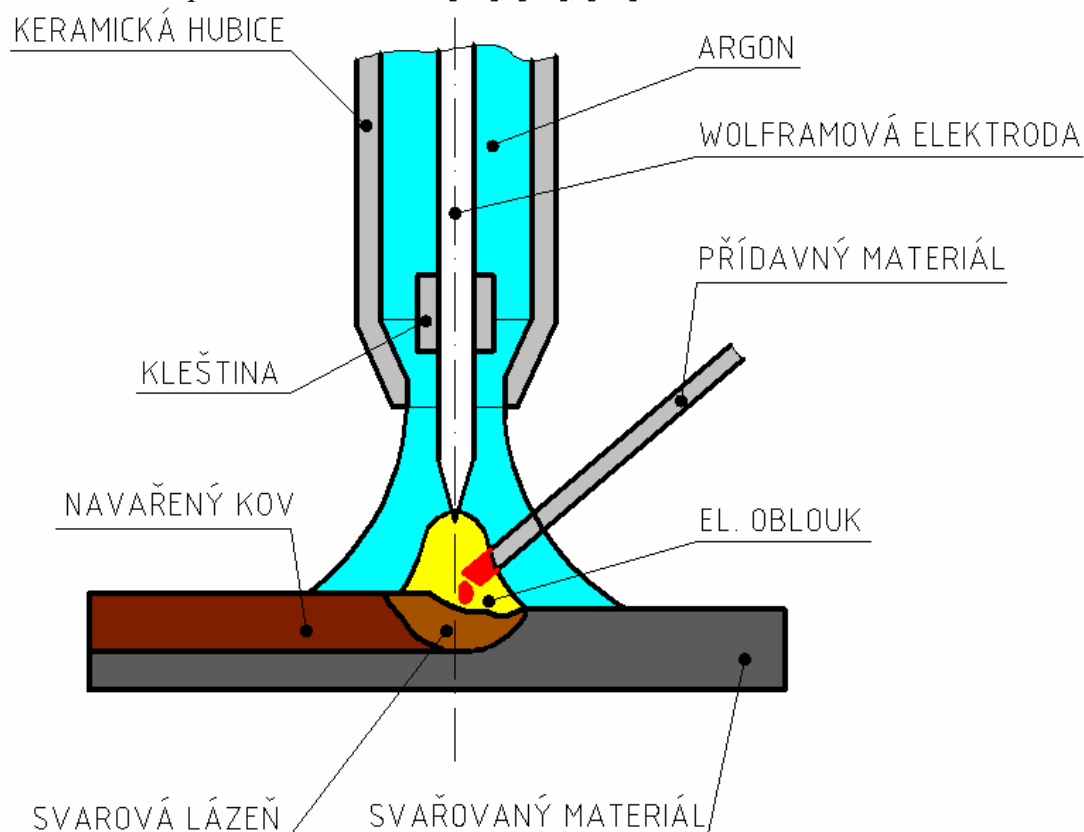
Elektrický oblouk hoří mezi netavnou elektrodou a základním materiálem v ochranném plynu. Ten chrání svar před přístupem vzduchu a usnadňuje zapalování oblouku. Elektroda se nesmí odtavovat, musí odolávat vysokým teplotám, proto je vyrobena z wolframu s příměsí dalšího prvku (Tab. 4.1.). Teplota tavení těchto elektrod se pohybuje kolem 3422 °C. Problémem u elektrod s přísadou thoria je jejich radioaktivita. Proto je třeba zajistit během svařování a broušení špičky elektrody kvalitní odvětrávání z důvodu ochrany zdraví operátora.

barva	legování
zelená	čistý wolfram 99,8 %
žlutá	thorium 1% ThO ₂
červená	thorium 2% ThO ₂
fialová	thorium 3% ThO ₂
oranžová	thorium 4% ThO ₂
šedá	cerium 2,0 % CeO ₂
černá	lantán 1,0 % LaO ₂
zlatá	lantán 1,5 % LaO ₂
modrá	lantán 2,0 % LaO ₂
bílá	zirkon 0,8 % ZrO ₂

Tab.4.1. Barevné označení a přísady elektrod

Nejpoužívanějšími elektrodami jsou šedá a zlatá. Lze je použít na svařování nerezavějících ocelí, mědi, titanu, uhlíkových ocelí, bronzů a hliníku.

Svařování může být provedeno pouze roztavením a slitím svařovaných materiálů nebo může být do svarové lázně přiveden přídavný materiál ve formě přídavného drátu podobného nebo stejného složení jako základní materiál. Princip svařovacího procesu je na Obr. 4.2. Svařování může být ruční, kdy svářeč v jedné ruce drží svařovací hubici a v druhé přídavný materiál, který dodává do svarové lázně. Tam ho postupně odtavuje podle potřeby. Tento proces lze také plně automatizovat. [25], [26], [28]



Obr. 4.2. princip technologie svařování TIG [25]

4.1.1. Výhody TIG

- dobrá kontrola nad svarovou lázní
- variabilita přídavných materiálů: lze použít drát, pásek či ústřížek ze základního materiálu
- vysoká teplota oblouku
- malá tepelně ovlivněná oblast
- malé tepelné deformace svaru
- možná regulace vneseného tepla
- výborná ochrana svarové lázně
- svařování tenkých materiálů

4.1.2. Nevýhody TIG

- technická náročnost svařovacího zařízení
- malá produktivita

4.1.3. Použití TIG

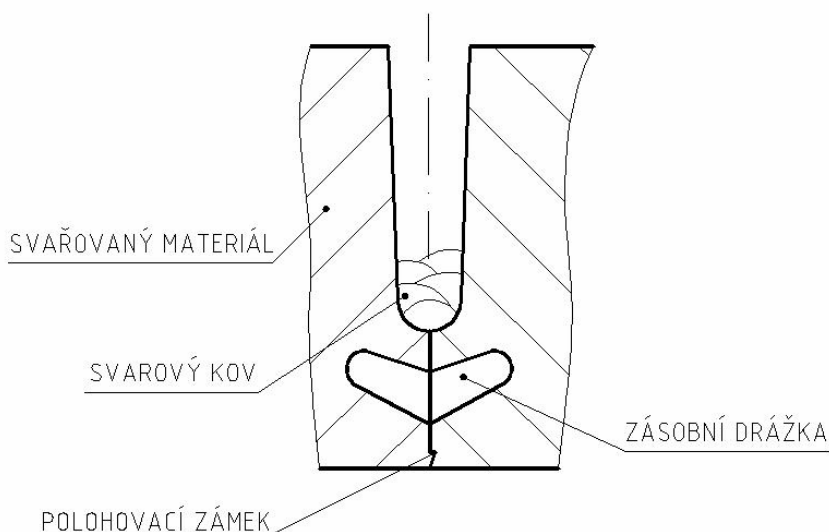
- kořenové svary na potrubí
- trubky kotlů v energetice
- tvarově složité konstrukce z hliníkových a nerezových materiálů
- svařování speciálních materiálů a heterogenních spojů: vysokolegované a nástrojové oceli, oceli pro energetiku, hliníkové materiály, titan, měď, bronzy a hořčík
- svařování velmi tenkých materiálů [25]



Obr. 4.3. Ukázka svarů TIG na potrubí [25]

4.2. Konstrukce svaru

Provedení konstrukce svaru je schématicky znázorněno na Obr. 4.4. Zásobní drážka slouží k zachycení nečistot vyprodukovaných vytvořením kořenové housenky. Zhotovení této drážky do žárupevného materiálu zvyšuje celkové náklady zhotovení svarku. Ustavení obou polovin parní turbíny je zajištěno polohovacím zámkem.



Obr. 4.4. Návrh svaru stávající technologie výroby

5. Závěry

Cílem diplomové práce bylo navrhnout přídatný materiál, tavidlo a svařovací parametry pro technologii 121 (svařování automaticky pod tavidlem drátovou elektrodou). Svařovaný materiál byla žárupevná ocel 30CrMoNiV 5-11, používaná v energetickém průmyslu. V mém případě pro rotor parní turbíny firmy SIEMENS Industrial Turbomachinery BRNO s.r.o.

V současné době se rotor svařuje pomocí technologie TIG. Stručný popis současného stavu je v bodě 4.

Po prostudování dané problematiky svařování metodou 121 do úzkého úkosu bylo navrženo vhodné tavidlo a vhodný přídatný materiál. Toto tavidlo a přídatný materiál byly experimentálně odzkoušeny v laboratořích VUT Brno na zkušebním vzorku. Zkoumala se odstranitelnost strusky ze svaru v závislosti na teplotě předhřevu.

Daná problematika je značně komplikovaná a je vhodné v ní pokračovat dalšími experimenty. Ať už se jedná o odstranitelnost strusky, tepelné zpracování a další technologické parametry.

Seznam použité literatury

- [1] KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. 1. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 136 s. ISBN 978-80-248-0870-3.
- [2] *Technická příručka ESAB : Příručka pro svařování pod tavidlem*. Vamberk : ESAB, 2005. 94 s. Dostupné z WWW: <[http://products.esab.com/ESABImages/SAW_CZ2009\(2\).pdf](http://products.esab.com/ESABImages/SAW_CZ2009(2).pdf)>.
- [3] MARTINEC, Jiří; ONDRAŠÍK, Břetislav. Svařování do úzkého úkosu ve společnosti Vítkovice, a.s.. *Spektrum : ESAB*. 2007, 2, s. 4-5.
- [4] KOVAŘÍK, Rudolf; ČERNÝ, František. *Technologie svařování*. 2. Plzeň : [s.n.], 2000. 186 s. ISBN 80-7082-697-5
- [5] HRIVNÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. Bratislava : STU, 2009. 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [6] BLAŠKOVIČ, Pavel; KOSEČEK, Miroslav; VEHNER, Ladislav. *Zváranie pod tavivom*. 2. Bratislava : Alfa, 1978. 448 s. ISBN 63-004-79.
- [7] KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK, Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. Ostrava : Ediční středisko VŠB-TU Ostrava, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [8] AMBROŽ, Oldřich; KANDUS, Bohumil; KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování a zařízení*. 1. Ostrava : Zeross, 2001. 395 s. ISBN 80-857771-81-0.
- [10] BARTÁK, Jiří; KÖNIGSMARK, Jiří. Úzkomezerové obvodové svary automatem pod tavidlem u silnostěnných tlakových nádob jaderných reaktorů. *Zváranie*. 1987, 36, 10, s. 309-314. ISSN 004455-25.
- [11] RADÍČ, Pavol. Technologické aspekty zvárania do úzkej medzery pod tavivom. *Zváranie-svařování*. 1997, 46, 3, s. 62-64. ISSN 044-5525.
- [12] PINKA, Eduard. Tavivá na zváranie v úzkej medzere. *Zváranie*. 1988, 37, 12, s. 372-375. ISSN 004455-25.
- [13] ASM Handbook. *Welding, Brazing and Soldering*. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3
- [14] Obloukové svařování pod tavidlem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, 10, [cit. 2010-04-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/obloukove-svarovani-pod-tavidlem>>.

- [15] *ESAB svařování a řezání* : Výrobky [online]. Vamberk : 2006 [cit. 2010-04-06]. Svařování pod tavidlem. Dostupné z WWW: <<http://products.esab.com/Templates/T087.asp?id=72854>>.
- [16] FOLDYNA, Václav ; KOUKAL, Jaroslav . Vývoj nových ocelí pro energetiku a chemické strojírenství na bázi 2 až 3 % Cr. *Zváranie - Svařování*. 2003, 1-2, s. 3-8. ISSN 044-5525.
- [17] ZEKE, Július; VINŠ, František. K volbě indexu zásaditosti zvaracích taviv. *Zváranie*. 1989, 38, 3, s. 69-74. ISSN 0044-5525.
- [18] MÜNCNER, Ladislav; ADAMIČKOVÁ, Mária; PIUSSI, Vladimír. Krehkolomové charakteristiky zvarových spojov materiálu 2,25Cr1Mo. *Zváranie*. 1988, 37, 12, s. 355-361. ISSN 0044-5525.
- [19] SOBOTKA, Jaromír . K problematice výběru vhodného přídavného materiálu pro svařování kotlových trubek z oceli typu 0,5Cr-0,5Mo-0,3V. *Zváranie - Svařování*. 1996, 45, 2, s. 25-28. ISSN 044-5525.
- [20] DOLEŽAL, Jozef; VEL'KÝ, Marian. Vplyv chýb na žiaropevné vlastnosti zvarových spojov. *Zváranie*. 1987, 36, 2, s. 40-41. ISSN 0044-5525.
- [21] HRIVŇÁK, Ivan, et al. Materiálové problémy zvarovania feritických a austenitických ocelí pre energetiku. *Zváranie - Svařování*. 1997, 46, 12, s. 270-274. ISSN 044-5525.
- [22] VLASÁK, Tomáš, et al. Žárupevnost svarových spojů ocele P23. *Zváranie - Svařování*. 2008, 57, 5, s. 135-140. ISSN 044-5525.
- [23] ZLÁMAL, Bronislav. *Strukturní stabilita heterogeních svarových spojů žárovevných ocelí*. Brno, 2007. 31 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. ISBN 978-80-214-3529-2, ISSN 1213-4198.
- [24] PLUHAŘ, Jaroslav; KORITTA, Josef. *Strojírenské materiály*. 2. Praha : SNTL, 1977. 568 s. ISBN 04-212-77.
- [25] TIG svařování I - základní principy.. In . [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2010-04-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008011702>>.
- [26] Wolfram. In . [s.l.] : [s.n.], 1998 [cit. 2010-04-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.tabulka.cz/prvky/ukaz.asp?id=74>>.
- [27] BARTÁK, Jiří, et al. *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. 1. Ostrava : Zeross, 2002. 418 s. ISBN 80-85771-97-7.
- [28] JOURA, Vít Wolframové elektrody pro TIG svařování. In *Wolframové elektrody pro TIG svařování*. [s.l.] : [s.n.], 2006 [cit. 2010-04-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2006111201>>.

- [29] KÁLNA, Karol, et al. *Konštrukcia a navrhovanie : III diel učebných textov pre kurzy zvaračských technológov*. 1. Ostrava : ZEROSS, 2001. 433 s. ISBN 80-857-771-86-1.
- [30] ČSN EN 760. *Svařovací materiály - Tavidla pro obloukové svařování pod tavidlem - Klasifikace*. Praha : český normalizační institut, 1997. 13 s.
- [31] ČSN EN 1011-2. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů : část 2: obloukové svařování feritických ocelí*. Praha : český normalizační institut, 2002. 56 s.
- [32] ČSN EN ISO 17633. *Svařovací materiály - Plněné elektrody a tyčinky pro obloukové svařování korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí s přívodem a bez přívodu ochranného plynu - Klasifikace*. Praha : český normalizační institut, 2007. 28 s.
- [33] ČSN EN ISO 24598. *Svařovací materiály - Drátové elektrody, plněné elektrody a kombinace elektroda - tavidlo pro obloukové svařování žárupevných ocelí pod tavidlem - Klasifikace*. Praha : český normalizační institut, 2008. 21 s.
- [34] Svetsaren. Esab. 2000, 54, 1, s. 1.
- [35] PILOUS, Václav . *Nové nízkouhlíkové oceli feritické báze a jejich vzájemná svařitelnost*. Konstrukce : Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství [online]. 2009, [cit. 2010-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/nove-nizkouhlikove-oceli-feriticke-baze-a-jejich-vzajemna-svaritelnost/>>. ISSN 1803-8433.
- [36] HAJDÍK, Jiří; HEINRICH, Michal. *Svařování vysokolegovaných ocelí : 1.část. Svět svaru* [online]. 2007, [cit. 2010-05-24]. Dostupný z WWW: <http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Svař.vysoce.leg1_2007.pdf>.
- [37] Firemní materiály firmy OERLIKON a WIRPO

Seznam použitých zkratek a symbolů

zkratka	jednotka	význam
A5	[%]	tažnost
BI	[-]	index bazicity
Cc	[%]	ekvivaletní uhlík
Ce	[%]	uhlíkový ekvivalent dle ČSN 05 1310
CE	[%]	uhlíkový ekvivalent dle mezinárodní svářečské instituce
CET	[%]	uhlíkový ekvivalent dle ČSN EN1011-2
Cr _E	[%]	chromový ekvivalent
d	[mm]	chrakteristický rozměr vtisku
ds	[μm]	střední průměr částic
F	[N]	zatěžující síla
HD	[ml.100g ⁻¹]	obsah difuzního vodíku
HV	[-]	tvrdost podle Vickerse
I	[A]	svařovací proud
Is	[μm]	vzdálenost částic sekundární fáze
J	[%hm]	Watanabeho faktor
K	[-]	součinitel kyselosti
K _d	[-]	konstanta rychlosti hrubnutí
K ₀	[-]	koeficient tuhosti spoje
K _s	[-]	intenzita tuhosti spoje
KV	[J]	nárazová práce (V vrub)
Mo _{ekv}	[%]	ekvivaletní obsah molybdenu
Ni _E	[%]	niklový ekvivalent
Nv	[-]	střední počet částic v jednotce objemu
P _{cm}	[%]	uhlíkový ekvivalent dle Ita a Bessya
Q	[J.mol ⁻¹]	zdánlivá aktivační energie hrubnutí
Q _s	[kJ.mm ⁻¹]	množství tepla přivedené do svaru
R	[J.K ⁻¹ .mol ⁻¹]	univerzální plynová konstanta
Rm	[MPa]	mez pevnosti v tahu
Rp _{0,2}	[MPa]	mez kluzu
s	[mm]	tloušťka svařovaného materiálu
T	[K]	termodynamická teplota
Ti	[°C]	teplota interpass
Tm	[°C]	teplota ohřevu
t ₀	[hod]	čas ohřevu na žíhací teplotu
Tp	[°C]	teplota předeřevu
t _v	[hod]	čas výdrže na žíhací teplotě
T _ž	[°C]	žíhací teplota
U	[V]	napětí při svařování
v	[mm.s ⁻¹]	rychlost svařování
X	[ppm]	Bruscatův faktor

Z	[%]	kontrakce
η	[-]	koefficient tepelné účinnosti

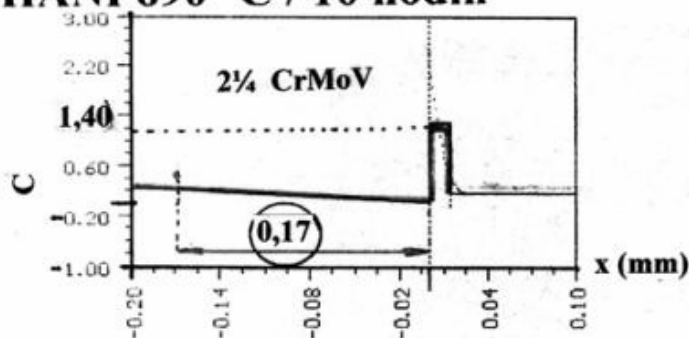
Seznam příloh

Příloha 1 – Průběh difúzních křivek uhlíku ve svarovém spoji ocelí 2,25CrMoV spolu s ocelí 14CrMoVNbN10-1 za různých podmínek tepelného zpracování a provozu

SVAŘOVANÝ ROTOR
2¼ CrMoV : 12 Cr – 14CrMoVNbN10-1

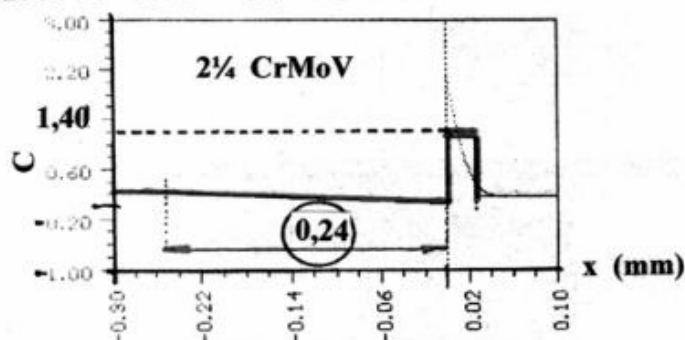
PŘÍLOHA 1

ŽÍHÁNÍ 690 °C / 10 hodin



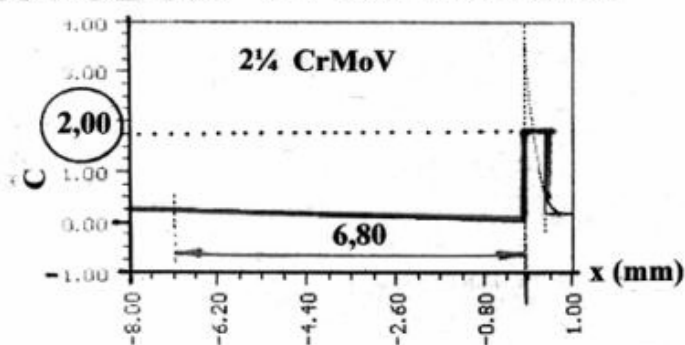
$$D_{\text{Cef}} \text{ (cm}^2\text{/s)} = 1,93 \cdot 10^{-9}$$

ŽÍHÁNÍ 730 °C / 10 hodin



$$D_{\text{Cef}} \text{ (cm}^2\text{/s)} = 4,43 \cdot 10^{-9}$$

PROVOZ 600 °C / 150 000 hodin



$$D_{\text{Cef}} \text{ (cm}^2\text{/s)} = 2,31 \cdot 10^{-10}$$